



## Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG

2021, 24(2), 106-119

DOI 10.4467/2543859XPKG.21.014.14957

Otrzymano (Received): 21.04.2021

Otrzymano poprawioną wersję (Received in revised form): 02.06.2021

Zaakceptowano (Accepted): 03.06.2021

Opublikowano (Published): 30.06.2021

# ZMIANY SIECI POZAMIEJSKIEGO PUBLICZNEGO TRANSPORTU AUTOBUSOWEGO W BIESZCZADACH I BESKIDZIE NISKIM – UJĘCIE TOPOLOGICZNE

## *Changes in the network of the non-urban public bus transport in Bieszczady and Beskid Niski mountains – a topological approach*

**Ariel Ciechański**

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. St. Leszczyńskiego PAN, Twarda 51/55, 00-818 Warszawa

e-mail: ariel@twarda.pan.pl



<https://orcid.org/0000-0002-4123-6533>

### Cytacja:

Ciechański A., 2021, Zmiany sieci pozamiejskiego publicznego transportu autobusowego w Bieszczadach i Beskidzie Niskim – ujęcie topologiczne, *Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG*, 24(2), 106-119.

**Streszczenie:** W artykule autor powraca do klasycznych niegdyś w geografii transportu metod grafowych. Wykorzystując podstawowe wskaźniki, takie jak liczba cyklomatyczna  $\mu$ , wskaźnik  $\alpha$  Kansky'ego, wskaźnik  $\gamma$  Kansky'ego i wskaźnik  $G_{ns}$  opracowany przez A. Ciechańskiego analizuje zmiany sieci pozamiejskiego autobusowego publicznego transportu zbiorowego na obszarze Beskidu Niskiego i Bieszczad. Testuje też wskaźnik  $G_{ns}$  dla bardziej rozbudowanych grafów o skomplikowanej strukturze, w tym również często z bardzo licznymi izolowanymi wierzchołkami. Niestety w przeciwieństwie do prostych i niespójnych sieci transportowych, dla których został on skonstruowany, w przypadku dużych sieci transportowych, zawierających liczne cykle jego czułość wykazuje znacznie gorszy poziom, a otrzymane wyniki są znacznie mniej jednoznaczne niż w przypadku gdy izolowane podgrafy są mniej liczne, za to o bardziej rozbudowanej strukturze.

**Słowa kluczowe:** metody grafowe, wskaźnik  $G_{ns}$ , zmiany sieci pozamiejskiego publicznego transportu zbiorowego, Beskid Niski, Bieszczady

**Abstract:** In the article, the author returns to the graph methods which were once classic in the transport geography. Using basic indicators such as the cyclomatic number  $\mu$ , the  $\alpha$  Kansky index, the  $\gamma$  Kansky index and the  $G_{ns}$  index developed by A. Ciechański, he analyzes the changes in the network of non-urban public bus transport in the area of the Beskid Niski and the Bieszczady Mountains. He also tests the  $G_{ns}$  indicator for more complex graphs with a complicated structure, including often very numerous isolated vertices. Unfortunately, unlike the simple and inconsistent transport networks for which it was created, in the case of large transport networks containing many cycles its sensitivity shows a much worse level and the obtained results are much less unambiguous than in the case when the isolated subgraphs are less numerous, but with the more elaborate structure.

**Keywords:** graph methods,  $G_{ns}$  index, changes in the network of extra-urban public transport, Beskid Niski, Bieszczady

## Wprowadzenie

Analiza sieci transportowych w ujęciu topologicznym stanowiła niegdyś istotny wycinek badań z zakresu geografii transportu. Prekursorem tego typu studiów w Polsce był prof. dr hab. Zbigniew Taylor, dlatego w dedykowanym Jemu jubileuszowym zeszycie Prac Komisji Geografii Komunikacji PTG nie mogło zabraknąć tej problematyki badawczej<sup>1</sup>.

W niniejszym artykule autor analizuje w ujęciu topologicznym zmiany sieci pozamiejskiego publicznego transportu autobusowego na obszarze badawczym, który stanowią tereny górskie w granicach współczesnych powiatów gorlickiego, jasielskiego, krośnieńskiego, sanockiego, leskiego i bieszczadzkiego (ryc. 1 i 2). Bazując na definicji publicznego transportu (ptz)

**port zbiorowy** przyjmuje się powszechnie dostępny regularny przewóz osób autobusami (w tym i busami) wykonywany w określonych odstępach czasu i po określonej linii lub sieci transportowej, dla którego organizatorem nie są jednostki samorządu miejskiego.

Zakres czasowy analizy obejmuje pięć przekrojów: 1955, 1974, 1990, 2019 i 2020 r. Część z nich posiada dodatkowe warianty zależne od dni kursowania połączeń autobusowych (dni powszednie, wolne od pracy itp.). Celem artykułu jest przybliżenie wskaźnika  $G_{ns}$  opracowanego przez Ciechańskiego (2013) oraz przetestowanie go na tle klasycznych mierników Kansky'ego (1963) dla sieci transportowych przedstawionych w postaci:

a) rozbudowanego spójnego grafu płaskiego z licznymi cyklami;



Ryc. 1. Sieć kolejowa na badanym obszarze w 2019 r. na tle podziału administracyjnego.

Wszystkie ryciny w artykule są opracowaniami własnymi autora.

zawartej w *Ustawie o publicznym transporcie zbiorowym* (2011), za **publiczny pozamiejski autobusowy trans-**

b) rozbudowanego grafu płaskiego, niespójnego, z licznymi podgrafami w postaci izolowanych wierzchołków.

Autor zakłada, że sprawdza się on w przypadku takich sieci znacznie gorzej, niż w przypadku sieci niespójnych z bardzo małą liczbą izolowanych podgrafów.

Punkt wyjściowy do analiz stanowią badania Kozaneckiej (1980) oraz Ciechańskiego (2020b; 2020c) przedstawiające układ sieci publicznego pozamiejskiego

<sup>1</sup> Artykuł częściowo powstał na podstawie badań w ramach realizacji projektu badawczego sfinansowanego przez NCN pt. *Empiryczne badania pilotażowe dotyczące problematyki wykluczenia transportowego na obszarach górskich na przykładzie powiatów Beskidu Niskiego i Bieszczad* (Miniatura 2, nr umowy 2018/02/X/HS4/00451).



Ryc. 2. Sieć drogowa na badanym obszarze w 2019 r.

transportu autobusowego na badanym obszarze we wskazanych powyżej przekrojach czasowych. W celu poznania jej struktury topologicznej sieć została sprowadzona do formy grafu płaskiego.

Po wprowadzeniu autor dokonuje przeglądu literatury dotyczącej wykorzystania metod grafowych w geografii transportu oraz badań dotyczących zmian sieci połączeń autobusowych na badanym obszarze. Następnie przybliży zastosowane wskaźniki grafowe. Stanowi to podstawę do analizy topologicznej sieci pozamiejskiego publicznego autobusowego transportu zbiorowego w Beskidzie Niskim i w Bieszczadach w wybranych przekrojach czasowych. Całość opracowania wieńczy jego podsumowanie.

### Miejsce analizy topologicznej sieci w literaturze geograficznej

Zainteresowanie polskich geografów metodami grafowymi wypływa z przypadającej na lata 1960. tzw. rewolucji ilościowej w geografii, która zarówno w zakresie geografii fizycznej, jak i ekonomicznej otworzyła nieznane wcześniej możliwości modelowania matematycznego (Chorley, Haggett, 1967). Twórcy podejścia systemowego w geografii Haggett i Chorley (1967) zauważyli, że te same metody można stosować w analizie zjawisk fizycznogeograficznych, jak również ekonomiczno-geograficznych. Szczególnie dotyczy to badań sieci (np. transportowych i rzecznych).

Pojawienie się rewolucji ilościowej w geografii skutkowało zastosowaniem analizy przestrzennej, której jednym z ważniejszych osiągnięć stała się analiza sieci. Haggett (1968) zaproponował w tym względzie podejścia uwzględniające: (1) lokalizację dróg, (2) określanie gęstości sieci i (3) modele zmian sieci. Można też stosować (Haggett, 1967) modele dotyczące: (1) pojedynczych dróg (ścieżek), (2) sieci niezawierających cykli (obwodów), (3) sieci z cyklami (obwodami), (4) sieci komórkowych i (5) sieci kompleksowych. W niniejszym badaniu przyjęto podejście wynikające z metod opartych na teorii grafów i polegające na analizie dróg (ścieżek) w sieci, dla których charakterystyczne jest występowanie cykli.

Wskaźniki grafowe w badaniach geografii transportu pojawiły się za sprawą Garrisona (1960) używającego mierników grafowych w analizie sieci autostrad międzystanowych w Stanach Zjednoczonych. Kluczową postacią dla tego typu badań był jednak Kansky (1963), który wprowadził do nauki całkowicie nowe wskaźniki grafowe charakteryzujące sieci transportowe. Zastosował je wraz z czterema wskaźnikami ekonomicznymi i geograficznymi do weryfikacji hipotezy o współzależności rozwoju sieci transportowych (kolei i autostrad w 25 krajach) i rozwoju gospodarczego krajów. Niemal identyczne badanie prowadził on także na poziomie stanów USA. Na podstawie uzyskanych wyników wyprowadził ogólne twierdzenia dotyczące sieci transportowych. Wskaźniki, których autorem był



Kansky (1963) nie zawsze spełniały oczekiwania i dawały oczekiwane odpowiedzi na pytania badaczy, stąd James i in. (1970) do badań geograficznych wprowadzili wskaźnik  $S-I$  Orda, umożliwiającą głębszą analizę sieci.

Mimo, że metody grafowe wprowadzono do analiz z zakresu geografii transportu ponad 60 lat temu, to wciąż chętnie są używane przez kolejne pokolenia naukowców, którzy zarówno wykorzystują klasyczne miary, jak i wprowadzają nowe wskaźniki i metody.

W pierwszej grupie mieści się m.in. praca Dupuy'a i Stransky'ego (1996), w której do analizy sieci autostrad w Europie wykorzystano klasyczne wskaźniki grafowe. Loo (1999), sięgnęła natomiast po klasyczne miary opracowane przez Kansky'ego (1963) i wykorzystała je badaniu dotyczącym wpływu „polityki otwartych drzwi” na rozwój sieci transportowej w delcie Zhujinag w Chinach. Gattuso i Miriello (2005) porównali i sklasyfikowali 25 sieci metra, łącząc to z wykorzystaniem wskaźników grafowych opartych na właściwościach geograficznych sieci. W Rosji metody grafowe na szerszą skalę stosował S. Tarkhov. W tym miejscu konieczne jest odniesienie się do dwóch jego klasycznych prac. W pierwszej z nich (Tarkhov, 2005) wykorzystując m.in. liczbę cyklomatyczną  $m$ , zaanalizowana została w ujęciu dynamicznym morfologia wybranych sieci transportowych świata. W drugiej pracy (Tarkhov, 2006) przedstawił on wyniki swoich badań dotyczących rozpadu sieci transportowych w ujęciu topologicznym i sklasyfikował przyczyny oraz skutki tego procesu. Erath i in. (2009) przy okazji badań nad siecią autostrad w Szwajcarii dokonali przeglądu wskaźników grafowych. Bardzo interesującą publikacją jest artykuł Blumenfeld-Lieberthal (2009), która podczas analizy sieci połączeń kolejowych pomiędzy 25 ośrodkami w wybranych państwach, wychodząc od miar stopnia węzła i jego współczynnika grupowania wyprowadziła cztery charakterystyki regionów oparte na grafach.

Istnieje również grupa autorów, dla których teoria grafów stanowi jedynie źródło inspiracji do wypracowania własnych technik i wskaźników. W tym nurcie niewątpliwie mieści się technika badawcza podwójnego grafu przedstawiona przez Anez i in. (1996). Nieco inne podejście do analizy sieci transportowych, oparte na wykorzystaniu *named-street centred model*, zaproponowali Jiang i Claramunt (2004). Xie i Levinson (2007) do analizy sieci zawierających cykle, zaproponowali natomiast nowe, własne miary oparte na właściwościach grafów (*ringness*, *webness* i *beltness*). W tym samym nurcie utrzymywały się badania Derrible i Kennedy (2010), którzy charakteryzując sieci metra w 33 krajach, skonstruowali trzy własne wskaźniki (*state*, *form* i *structure*) oparte na elementach teorii grafów. Owocem pracy tej samej grupy autorów (Derrible, Kennedy, 2011) jest swoiste kompendium wiedzy na temat możliwości

analizy topologicznej sieci transportowych, w którym omówili oni praktycznie pełną gamę klasycznych miar. Osobnym aspektem tego opracowania było wprowadzenie kolejnych wskaźników bezpośrednio związanych z analizą takich sieci.

Niestety polscy geografowie transportu bardzo rzadko sięgali w swoich badaniach po elementy teorii grafów, na dodatek w sposób mniej innowacyjny, niż ma to miejsce w światowej literaturze przedmiotu. Za prekursora tego typu badań należy uznać Taylora. W pracach z 1975 i 1979 r. odwoływał się on do analizy topologicznej sieci transportu miejskiego Poznania. W pierwszej z nich przybliżył polskim naukowcom przy okazji podstawowe wskaźniki grafowe. Szczególnie istotne z punktu widzenia polskiej geografii transportu było drugie opracowanie (Taylor, 1979), w którym autor przeprowadził bardzo głęboką analizę topologiczną sieci transportu miejskiego Poznania. Ratajczak (1980) wykorzystał klasyczne i nowe własne wskaźniki grafowe jako podstawę zaawansowanych analiz matematyczno-statystycznych oddziaływania czynników społeczno-gospodarczych i środowiska przyrodniczego na sieci transportowe w byłym województwie poznańskim. Sagan i Palmowski (1987) badali natomiast w czterech przekrojach czasowych sieć kolei na zapleczu aglomeracji gdańskiej. Podobny charakter miała praca doktorska Komusińskiego (2010), który zastosował miary Kansky'ego w analizie zmian sieci kolejowych połączeń pasażerskich w latach 1988-2008. Na znacznie większą skalę powyższe wskaźniki wraz z wskaźnikiem  $S-I$  Orda wykorzystał Ciechański (2013) w swoich badaniach dotyczących rozwoju i regresu sieci kolei przemysłowych w Polsce w latach 1881-2010. Ponadto zaproponował on własny wskaźnik  $G_{ns}$ . Z późniejszych prac z tej tematyki należy wspomnieć o badaniach Wiśniewskiego (2014) dotyczących spójności sieci transportowych w województwie łódzkim.

### **Sieć publicznego transportu autobusowego w Beskidzie Niskim i Bieszczadach w świetle badań geograficznych**

Odrębny aspekt przeglądu dorobku badawczego stanowi literatura poświęcona zmianom sieci połączeń autobusowych na badanym terenie. Jest on ogólnie o wiele skromniejszy niż w przypadku transportu kolejowego (np. Lijewski, 1959; Lijewski, Koziarski, 1995; Taylor, 2007). Pierwszym opracowaniem, które rzuca pewne światło na kształt i zmiany sieci autobusów podmiejskich na badanym obszarze była praca Kozaneckiej (1980), w której szczególnie cenne jest utrwalenie obrazu pozamiejskiego transportu autobusowego w kilku przekrojach czasowych. Dopiero Ciechański podjął badania nad zmianami sieci transportowej na tym obszarze. Przed wszystkim zwrócił on uwagę na problemy

z dostępem do pełnych informacji o funkcjonującej na badanym obszarze siatce połączeń pozamiejskiego autobusowego publicznego transportu zbiorowego (Ciechański, 2019). Ponadto przeanalizował, w trzech przekrojach czasowych, narastający regres tego środka transportu zauważalny w powiatach Beskidu Niskiego i Bieszczad (Ciechański, 2020a; 2020b; 2020c). Zbliżone badania dla podregionu przeprowadził Beim i in. (2019).

## Metoda

Podstawowym źródłem umożliwiającym stworzenie grafów płaskich dla przekrojów czasowych 1955 i 1974 były mapy zamieszczone w pracy Kozaneckiej (1980) oparte na wydawanych w formie książkowej *Rozkładach Jazdy Autobusów* (nawet w formie 17 tomów). Ich tomy 1990/91 posłużyły również autorowi niniejszego artykułu do opracowania bazy danych, a następnie map, które stanowiły podstawę do stworzenia grafów płaskich dla 1990 r. Znacznie trudniejsza sytuacja dotyczyła roku 2019 oraz okresu pierwszego lock-downu wiosną 2020 r. Rozdrobnienie rynku przewozów autobusowych doprowadziło do zaprzestania wydawania książkowych rozkładów jazdy. Wobec takiego obrotu spraw obecnie najpewniejszym źródłem danych są rozkłady składane do właściwych organów samorządu terytorialnego jako załączniki do wniosków o zgodę na prowadzenie przewozów. Z tego powodu zebranie informacji dla analityka staje się niezwykle skomplikowane. Uzupełniające źródło wiedzy stanowią internetowe wyszukiwarki połączeń (głównie e-podroznik.pl należąca do firmy Teroplan) oraz wszelkie przejawy własnej działalności przewoźników w tej sieci. Ponadto nierzadko rozkłady publikują lokalne portale (np. krosno24.pl), ale ich aktualność i wiarygodność jest zróżnicowana. Tak więc dla sporej grupy przewoźników brak jest źródeł wiedzy o ich rozkładzie, dostępnych poza obszarem ich działania. Jej zdobycie wymagało więc czasochłonnego i kosztownego sprawdzenia rozkładów „na gruncie”. Dopiero całkowicie autorskie bazy danych powstałe na podstawie tak licznych i rozproszonych źródeł informacji mogły posłużyć do wykreślenia map, a następnie zobrazowania ich zasadniczej treści w postaci grafów płaskich.

Podstawową metodą stosowaną w niniejszym badaniu jest analiza topologiczna sieci. Zgodnie z opinią Potrykowskiego i Taylora (1982), w celu łatwiejszego studiowania cech sieci transportowych konieczne jest dokonanie pewnych uproszczeń rzeczywistych sieci i przedstawienie ich w postaci grafu. Podstawę analizy topologicznej stanowi bowiem przedstawienie istniejącej sieci transportowej jako abstrakcyjnego zbioru punktów (węzłów albo wierzchołków – tworzących koniec danego układu sieciowego), połączonych zbiorem linii (odcinków, krawędzi albo łuków). Ujęcie

grafowe zwraca uwagę na układ połączeń między węzłami, ponadto w grafach nieskierowanych ignoruje informacje dotyczące orientacji. Pomijane są także informacje metryczne i dotyczące przepustowości sieci.

Z powyższych uwag wynikają następujące założenia przeprowadzanych analiz:

- wszystkie sieci mają charakter grafu płaskiego;
- dla uproszczenia jako wierzchołki traktuje się tylko te miejsca, gdzie następuje spotkanie co najmniej trzech krawędzi i ich punkty końcowe;
- w przypadku rozpadu sieci na podgrafy stosuje się dwa podejścia:
  - o osamotnione wierzchołki traktuje się jako izolowane podgrafy,
  - o osamotnione wierzchołki redukuje się.

Aby osiągnąć założone cele badawcze konieczne było przyjęcie za Potrykowskim i Taylorem (1982), że w minimalnie spójnej sieci liczba krawędzi  $e_{\min}$  jest zawsze mniejsza o jeden od liczby wierzchołków  $v$ , co można zapisać w postaci

$$e_{\min} = v - 1$$

Do porównania złożoności dwóch i więcej sieci niezbędne są miary, którymi można opisać stopień spójności sieci. Ponieważ opracowanie dotyczy danych historycznych, stosuje się w nim klasyczne mierniki spójności i kształtu sieci, takie jak: liczba cyklomatyczna  $m$ , wskaźniki  $\alpha$  i  $\gamma$  Kansky'ego oraz wskaźnik  $G_{ns}$ .

Liczba cyklomatyczna (inaczej pierwsza liczba Bettiego) wyrażona jest wzorem  $\mu = e - v + p$ , gdzie:

- $\mu$  – stopień spójności sieci
- $v$  – liczba wierzchołków
- $e$  – liczba krawędzi
- $p$  – liczba izolowanych podgrafów.

Grafy niespójne ( $p > 1$ ) oraz drzewa przyjmują wartości liczby cyklomatycznej równe zero. Grafy bardziej spójne mają wskaźniki wyższe, maksymalnie osiągające wartość  $(v-1)(v-2)/2$  (Potrykowski, Taylor, 1982).

Autorem wielu wskaźników jest Kansky (1963). W odróżnieniu od liczby cyklomatycznej nie wywodzą się one bezpośrednio z teorii grafów, lecz opierają się na topologicznych właściwościach grafów:

- wskaźnik  $\alpha$  stanowi poprawioną formę liczby cyklomatycznej. Dla grafów płaskich przyjmuje on postać  $\alpha = \mu/(2v-5)$ , natomiast dla grafów niepłaskich  $\alpha = 2\mu/(v-1)(v-2)$ . Przybiera on wartości od bliskich 0 do bliskich 1 (największa spójność). Drzewa i grafy niespójne mają omawiany wskaźnik równy 0;
- wskaźnik  $\gamma$  wyraża stosunek rzeczywistej liczby krawędzi do maksymalnie możliwej liczby krawędzi. Dla grafów płaskich przybiera postać  $\gamma = e/3(v-2)$ , a dla grafów niepłaskich  $\gamma = 2e/v(v-1)$ . Wskaźnik ten dostarcza informacji o wielkości potrzebnych uzupełnień w sieci. Przyjmuje on wartości od 0

(brak spójności) do 1 (spójność maksymalna), a jego wartość jest niezależna od liczby wierzchołków.

Kansky (1963) opracował jeszcze kilka innych wskaźników spójności opartych na odległościach metrycznych. Ze względu na ich uzupełniający charakter względem dwóch wspomnianych miar i mniejszą porównywalność (brak możliwości wyrażenia w %), nie zastosowano ich w niniejszym badaniu.

Każdy ze stosowanych wskaźników reaguje na inne cechy. Dla niektórych z nich interpretacja jest niejednoznaczna (np. obecność cykli w podgrafach grafu niespójnego zaburza interpretację liczby cyklo-matycznej). Wraz ze wzrostem liczby krawędzi grafu rośnie trudność jego interpretacji. Z krytycyzmu wobec dotychczasowych wskaźników bardzo słabo reagujących na cechy grafów niespójnych wynikła propozycja nowego wskaźnika  $G_{ns}$ , który pozwala:

- (1) odróżnić grafy niespójne od grafów w formie prostego drzewa;
- (2) rozróżnić strukturę poszczególnych grafów niespójnych (Ciechański, 2013).

Punkt wyjścia do jego konstrukcji stanowiła zasada, że w minimalnie spójnej sieci liczba wierzchołków zawsze jest o 1 większa niż liczba krawędzi. Ponieważ poza opracowaniem Ciechańskiego (2013) nie jest on szerzej przedstawiany w literaturze przedmiotu, poniżej został omówiony bardziej szczegółowo. Wskaźnik  $G_{ns}$  oblicza się według wzoru:

$$G_{ns} = \frac{e+1}{pv}$$

gdzie:

$G_{ns}$  – wskaźnik grafu niespójnego wyrażony w procentach,  
 $e$  – liczba krawędzi grafu,  
 $v$  – liczba wierzchołków grafu,  
 $p$  – liczba izolowanych podgrafów.

Wskaźnik ten wykazuje następujące właściwości:

- dla spójnego grafu o strukturze prostego drzewa przyjmuje wartości równe 100%,
- dla grafów spójnych z cyklami przyjmuje wartości powyżej 100%, przy czym jego wartość maleje wraz ze spadkiem liczby cykli i krawędzi,
- dla grafów niespójnych charakterystyczne są wartości oscylujące ok. 50%. W przypadku występowania cykli w którymś z podgrafów wartość ta przekracza 50%, w przypadku dwóch prostych podgrafów o strukturze drzewa osiąga zazwyczaj wartość od 35 do 49% – rośnie ona wraz ze wzrostem łącznej liczby krawędzi w grafie,
- wraz ze wzrostem liczby podgrafów spada także wartość omawianego wskaźnika (Ciechański, 2013).

## Zmiany sieci pozamiejskiego publicznego transportu autobusowego w Bieszczadach i Beskidzie Niskim w ujęciu grafowym

Dzięki pracy Kozaneckiej (1980) w analizach topologii sieci można cofnąć się do początków funkcjonowania pozamiejskiego rozkładowego transportu autobusowego na badanym obszarze. Ponieważ jednak w pierwszym badanym przez wspomnianą wyżej autorkę przekroju (1948 r.) sieć połączeń miała charakter szczytkowy, został on pominięty w niniejszym artykule. Natomiast kolejny przekrój czasowy, dotyczący roku 1955, mógł już stanowić podstawę do dalszych analiz. Ówczesna sieć była niewątpliwie spójna, aczkolwiek niezbyt skomplikowana, ale pozbawiona zarówno cykli, jak również izolowanych podgrafów. 28 krawędzi oraz 27 wierzchołków tworzyło graf o strukturze typowego drzewa (ryc. 3, tab. 1) co potwierdzał zarówno wskaźnik  $a$  Kanskiego o wartości 0%, jak również wskaźnik  $G_{ns}$  o wartości 100%. Wraz z rozrostem sieci rosła także jej złożoność topologiczna. W 1974 r. obserwowana była sieć o 124 krawędziach i 106 wierzchołkach (ryc. 4, tab. 1). Była to także sieć spójna z obecnością licznych cykli (liczba cyklo-matyczna  $\mu = 19$ ), jak również wskaźnikiem  $G_{ns}$  o wartości blisko 118%, niemniej jednak charakteryzująca się stosunkowo niską spójnością (wskaźnik Kanskiego  $g = 39,74\%$ ). Wciąż więc, gdyby rozbić graf na mniejsze, obserwowany byłby nieco rozbudowany o cykle graf w formie drzewa. Co ważne, pomimo znacznej rozbudowy pod względem topologicznym, jego spójność nie wzrosła istotnie.

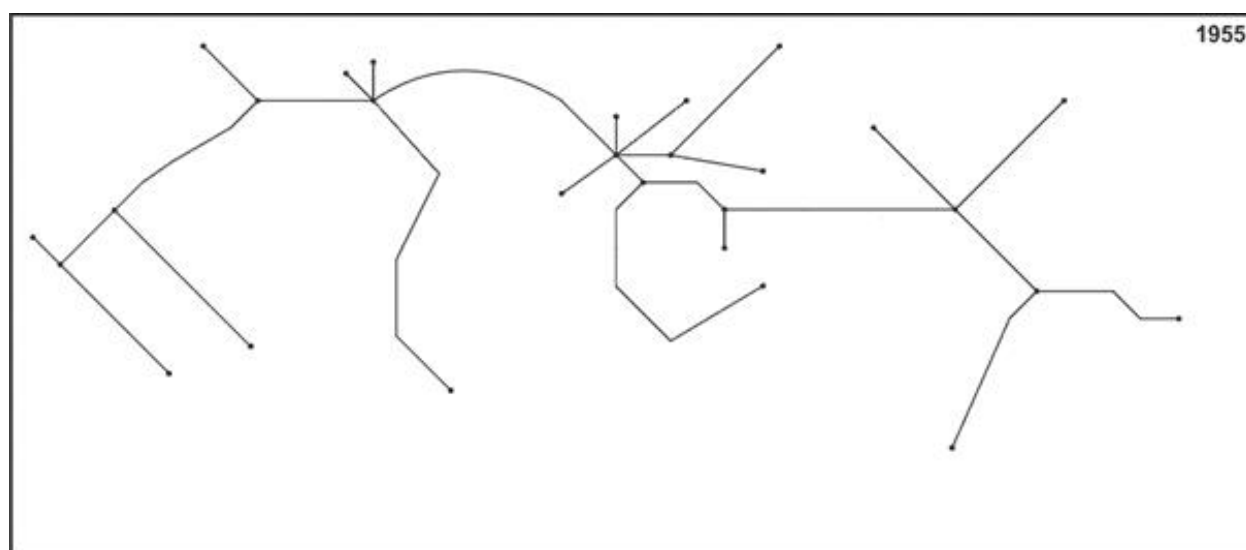
Nieco inaczej sytuacja wyglądała w 1990 r. Dysponując autorską bazą danych można było przede wszystkim przeprowadzić bardziej pogłębione analizy dla poszczególnych przedziałów czasowych (ryc. 5, tab. 1), tj. dni powszednich i dni wolnych od pracy (także w zależności czy jest to okres wakacyjny czy też pozawakacyjny). Ponadto w przypadku dni wolnych od pracy osobno przeanalizowano grafy, w których izolowane węzły redukuje się, oraz osobno, w których włącza się je do analizy topologicznej jako izolowane podgrafy.

W stosunku do roku 1974 r. obserwowana sieć transportowa uległa znaczącej rozbudowie. W dzień powszedni w roku szkolnym składała się ona z 305 krawędzi (blisko 2,5 raz więcej niż w 1974 r.) i 249 wierzchołków (nieco ponad 2,3-krotny wzrost). W wakacje, ze względu na sezonową obsługę odcinka Wetlina–Ustrzyki Górne, te wartości ulegały drobnym wahaniom (ryc. 6). Generalnie, choć dochodziło tu do zamknięcia jednego z cykli, to nie wpływało to praktycznie na topologię sieci i w dalszej części rozważań nie będzie stosowany podział na okres wakacyjny i pozawakacyjny. Graf stanowiący obraz tej sieci był

Tab. 1. Parametry topologiczne analizowanych sieci w różnych przekrojach czasowych.

Rok	Wariant sieci	Liczba				Wskaźnik		
		krawędzi grafu $e$	wierzchołków grafu $v$	izolowanych podgrafów $p$	cyklo-matyczna $\mu$	Kansky'ego		$G_{ns}$
						$\alpha$	$\gamma$	
[%]								
1955	-	27	28	1	0	0	34,62	100
1974	-	124	106	1	19	9,18	39,74	117,92
1990	dzień roboczy, zwykły	305	249	1	57	11,56	41,16	122,89
	dzień roboczy w wakacje	304	247	1	58	11,86	41,36	123,48
	dzień wolny od pracy, zwykły	265	229	1	37	8,17	38,91	116,16
	dzień wolny od pracy w wakacje	265	248	20	37	7,54	35,91	5,36
	dzień wolny od pracy, zwykły (graf niespójny)	264	227	1	38	8,46	39,11	116,74
	dzień wolny od pracy w wakacje (graf niespójny)	264	246	20	38	7,80	36,07	5,39
2019	dzień nauki szkolnej	286	243	1	44	9,15	39,56	118,11
	dzień roboczy wolny od nauki szkolnej	270	227	1	44	9,80	40,00	119,38
	dzień roboczy wolny od nauki szkolnej (graf niespójny)	270	243	17	44	9,15	37,34	6,56
	dzień wolny od pracy i nauki szkolnej	189	165	1	25	7,69	38,65	115,15
	dzień wolny od pracy i nauki szkolnej (graf niespójny)	189	250	86	25	5,05	25,40	0,88
	dzień wolny od pracy i nauki szkolnej (z pociągami do Komańczy)	193	165	1	29	8,92	39,47	117,58
	dzień wolny od pracy i nauki szkolnej i (graf niespójny, z pociągami do Komańczy)	193	250	83	26	5,25	25,94	0,93
	dzień wolny od pracy i nauki szkolnej w wakacje	189	164	1	26	8,05	38,89	115,85
	dzień wolny od pracy i nauki szkolnej w wakacje (graf niespójny)	189	249	86	26	5,27	25,51	0,89
	dzień wolny od pracy i nauki szkolnej w wakacje (z pociągami do Łupkowa)	192	164	1	29	8,98	39,51	117,68
	dzień wolny od pracy i nauki szkolnej w wakacje (graf niespójny, z pociągami do Łupkowa)	192	249	86	29	5,88	25,91	0,90
2020	dzień roboczy w kwietniu 2020 (okres pierwszego lock-downu)	132	119	1	14	6,01	37,61	111,76
	dzień roboczy w kwietniu 2020 (okres pierwszego lock-downu, graf niespójny)	132	243	125	14	4,98	15,49	0,44

Źródło: opracowanie własne.

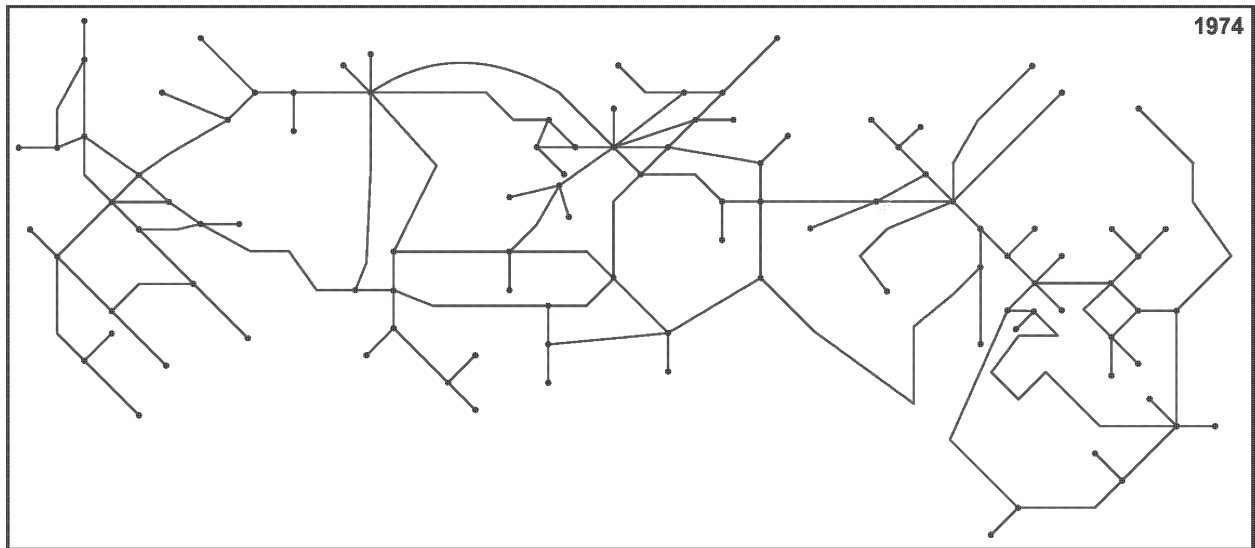


Ryc. 3. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 1955 r. w postaci grafu.

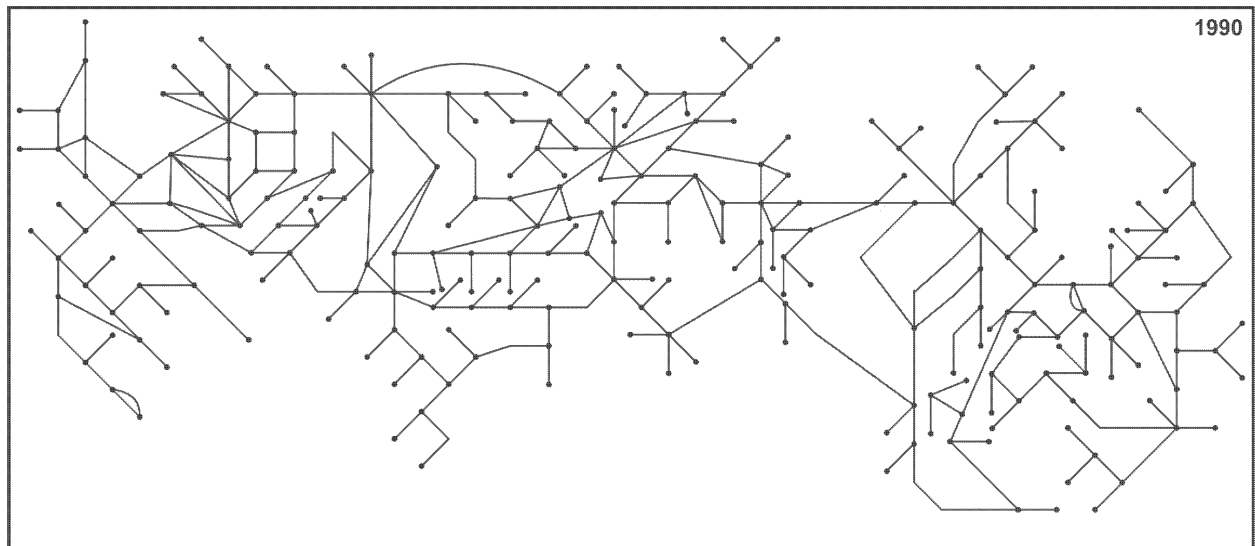


niewątpliwie bardziej skomplikowany niż to miało miejsce w 1974 r. Już przy pobieżnej analizie świadczył o tym choćby większy wzrost liczby cyklomatycznej niż liczby krawędzi i wierzchołków (wzrosła ona trzykrotnie). Niewątpliwie jednak skala uzupełnień sieci była niewystraszająca, o czym świadczą wartości innych analizowanych parametrów grafu, które w stosunku do 1974 r. wzrosły nieznacznie (zmiana wskaźników Kansky'ego o ok. 1,5-2,5 punktu procentowego oraz  $G_{ns}$  o niecałe 5 punktów procentowych).

13%, ale liczba wierzchołków zmniejszyła się tylko o ok. 8%, a liczba cyklomatyczna  $\mu$  z 57 zmniejszyła się do 37 (ubytek blisko 35%) (tab. 1). To wraz ze spadkiem wartości pozostałych wskaźników wskazuje na uproszczenie się sieci połączeń, zwłaszcza poprzez rozerwanie wielu cykli. Potwierdzają to wartości parametrów grafu w momencie włączenia do analizy wierzchołków grafu pozbawionych krawędzi łączących je z pozostałą siecią. Co prawda liczba cyklomatyczna w stosunku do sieci, z której usunięto izolowane podgrafy pozostawała



Ryc. 4. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 1974 r. w postaci grafu.

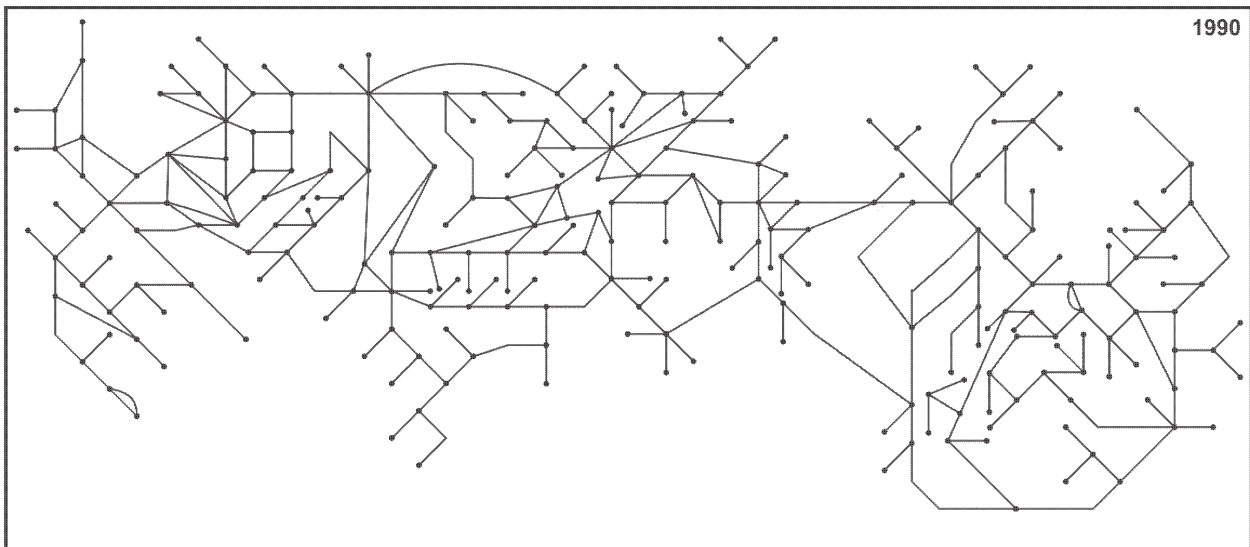


Ryc. 5. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 1990 r. w dni robocze w postaci grafu.

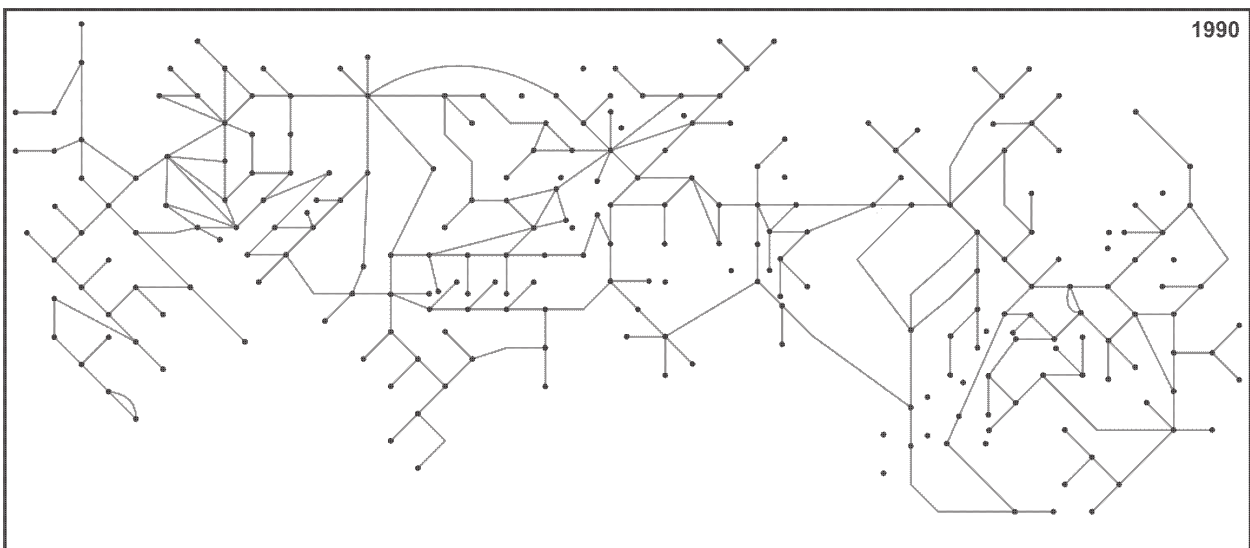
Do interesujących wniosków prowadzi analiza grafu przedmiotowej sieci w 1990 r. dla dni wolnych (ryc. 7 i 8). Jeśli spojrzeć na nią redukując nieobsługiwane miejscowości to sytuacja przedstawiała się stosunkowo korzystnie. Liczba krawędzi co prawda spadła o ok.

tu bez zmian, ale wartości pozostałych parametrów uległy zmniejszeniu. Spadek spójności sieci widoczny był szczególnie na podstawie wskaźnika  $G_{ns}$ , który uległ zmniejszeniu się o ponad 110 punktów procentowych.

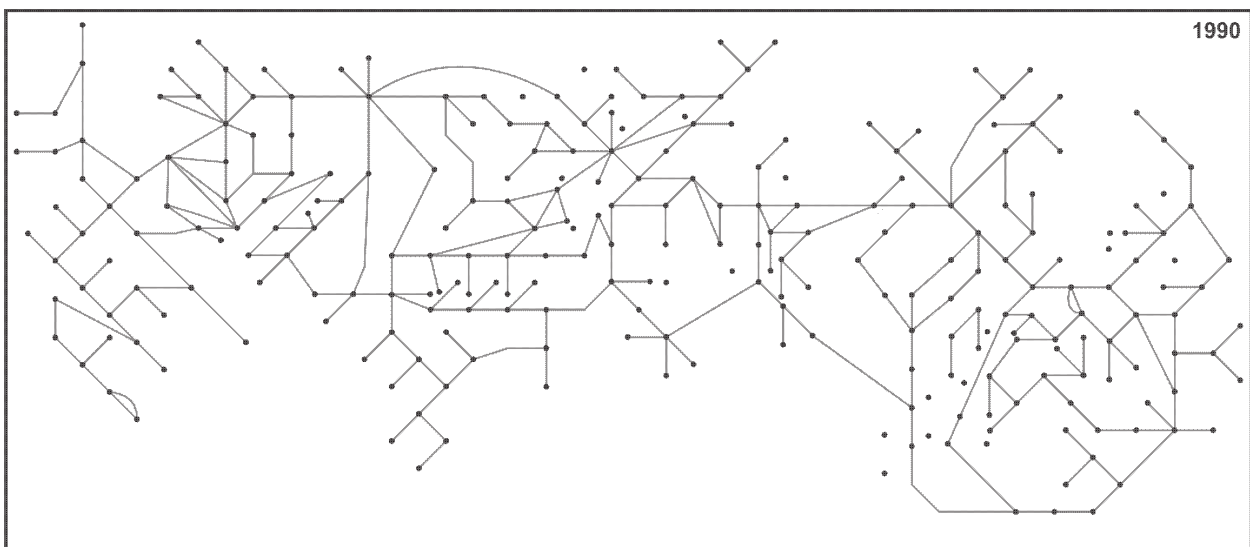




Ryc. 6. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w wakacje 1990 r. w dni robocze postaci grafu.



Ryc. 7. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 1990 r. w dni wolne od pracy w postaci grafu.

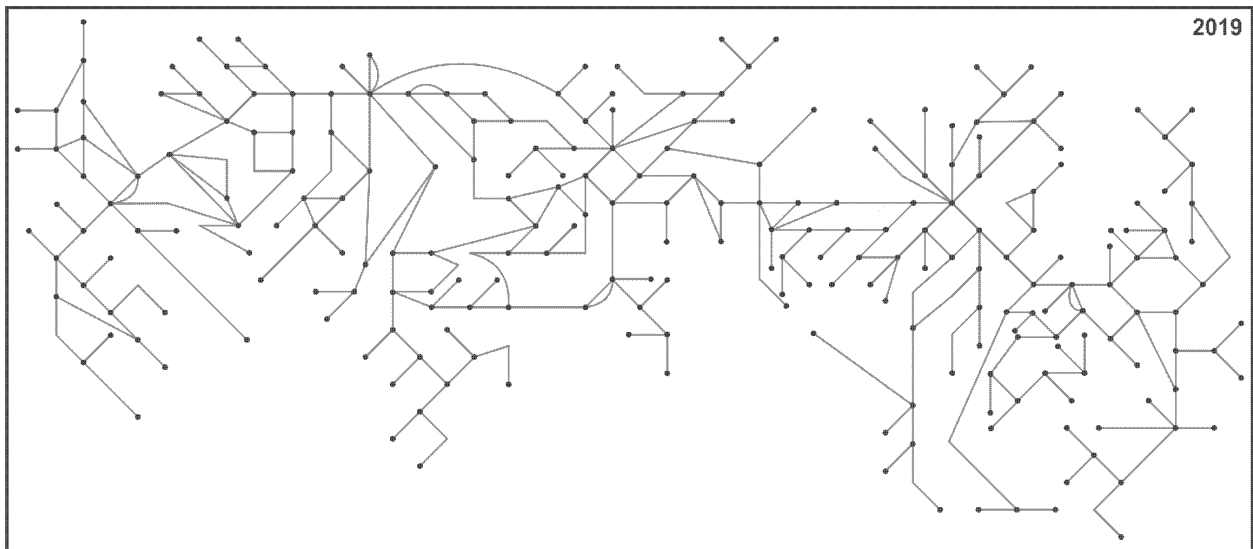


Ryc. 8. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w wakacje 1990 r. w dni wolne od pracy w postaci grafu.

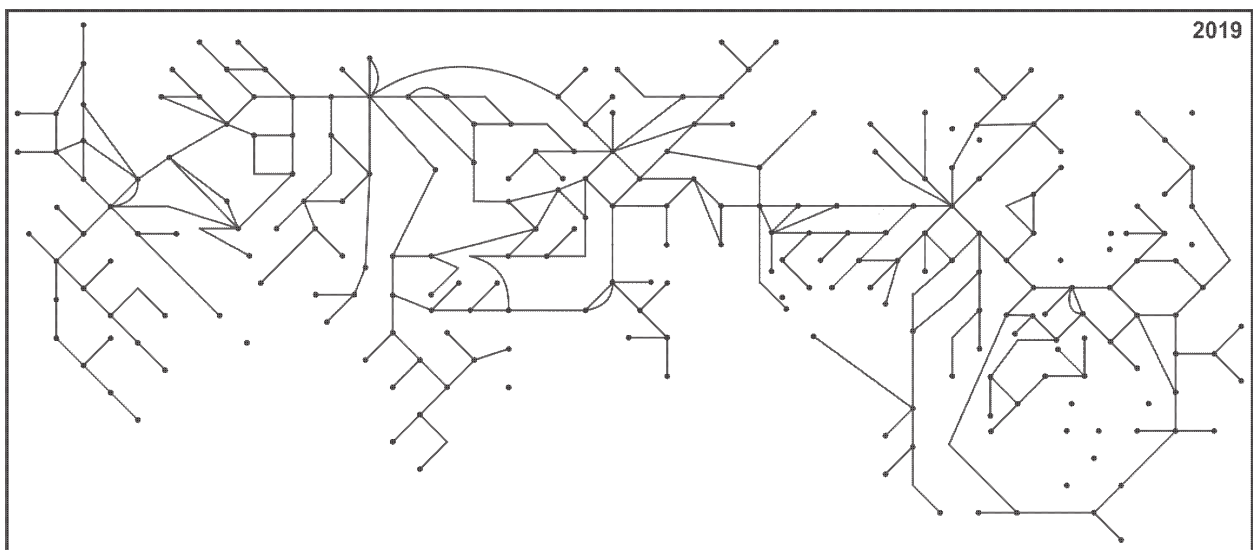
Procesy transformacji gospodarczo-ustrojowej odbiły się także na obrazie sieci transportowej w postaci grafu płaskiego. W 2019 r. obserwowany był stopniowy rozpad sieci. Wyjściowy punkt dalszej analizy stanowił tu układ sieci w dni nauki szkolnej. Liczba krawędzi grafu będącego jej obrazem uległa względem 1990 r. redukcji odpowiednio o 19 (do 286), a liczba wierzchołków jedynie o 6 (do 243) (ryc. 9, tab. 1). O ile parametry te nie oddają wyraźnie charakteru zmian, to jeśli weźmie się pod uwagę liczbę cyklomatyczną  $m$  (zmiana z 57 do 44) zauważalny był wyraźny trend do upraszczania się sieci i rozrywania ścieżek, które 29 lat wcześniej tworzyły zamknięte cykle. Można podejrzewać, że sprzyjała temu szczególnie likwidacja połączeń przecinających granice powiatów. Także wartości wskaźników

Kansky'ego i  $G_{ns}$  uległy tu zmniejszeniu, co potwierdza tylko poczynione obserwacje.

W 2019 r. pewnym *novum* w stosunku do 1990 r. było pojawienie się połączeń obsługiwanych tylko w dni nauki szkolnej. Oczywiście rzutowało to na grafowy obraz sieci w dni robocze wolne od zajęć lekcyjnych (ryc. 10). Skala zmian nie była na szczęście znaczna. Liczba cyklomatyczna  $m$  (tab. 1) pozostawała tu niezmienną pomimo pewnej redukcji liczby krawędzi i wierzchołków grafu. Także pozostałe analizowane wskaźniki grafowe w tym miejscu uległy niewielkiemu wahnięciu, co świadczyło bardziej o redukcji ślepo zakończonych połączeń niż o przerywaniu cykli. Nawet jeśli pozostawione bez połączeń wierzchołki potraktuje się jako izolowane podgrafy to większość wskaźników



Ryc. 9. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 2019 r. w dni nauki szkolnej w postaci grafu.



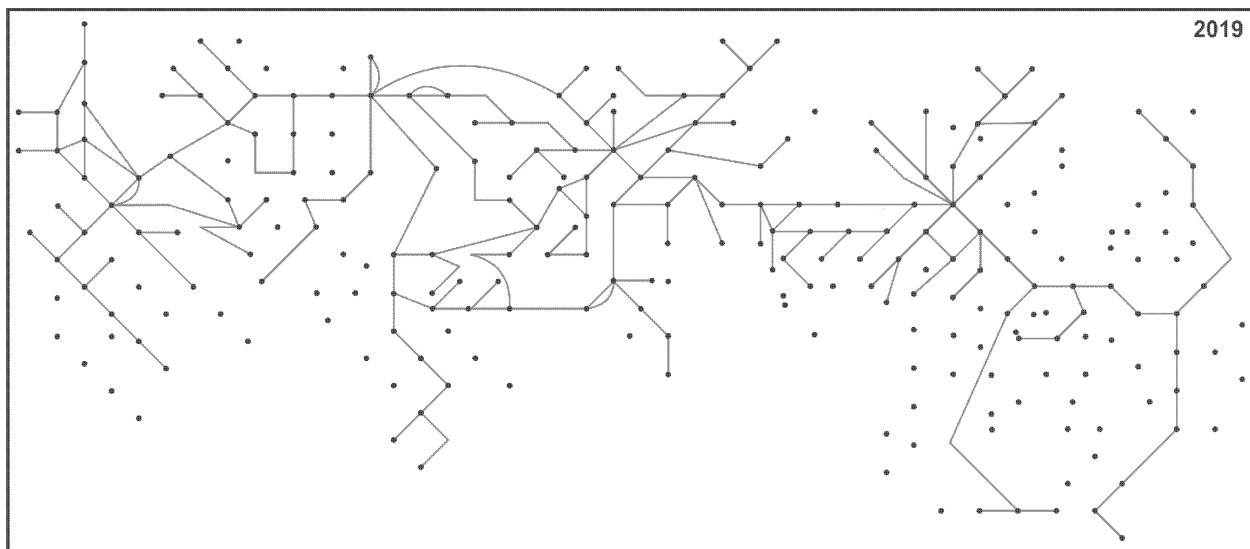
Ryc. 10. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 2019 r. w dni robocze wolne od nauki szkolnej w postaci grafu.

nie ulegała większej zmianie (jedynie wskaźnik  $G_{ns}$ , szczególnie czuły na grafy niespójne, notował gwałtowne zmniejszenie się wartości).

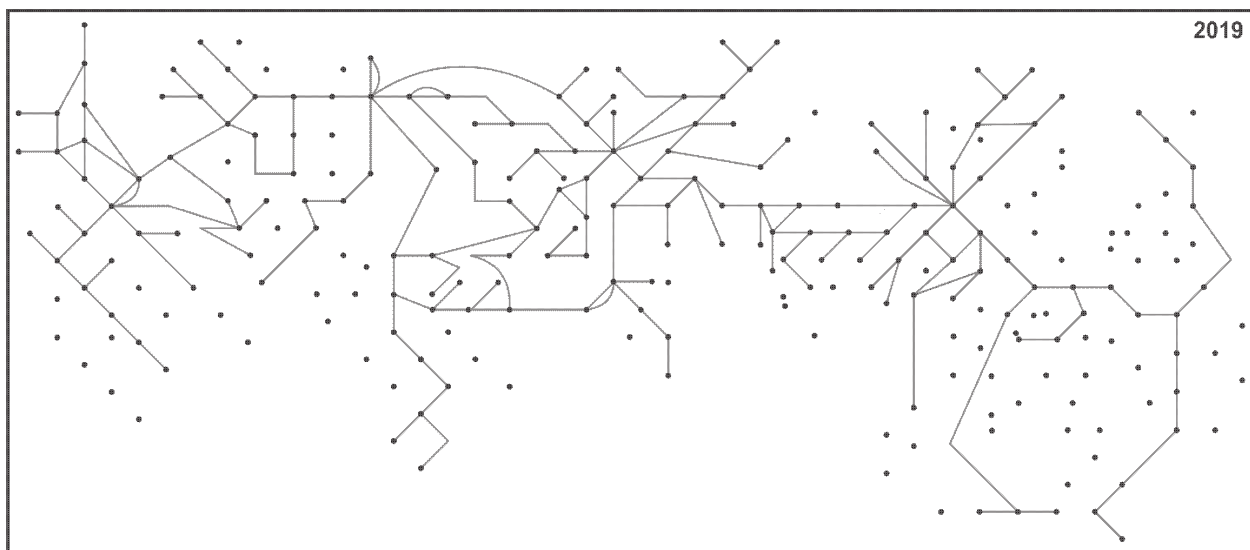
Bardziej złożona sytuacja i zarazem większa skala zmian zaobserwowana została w przypadku grafów stanowiących obraz sieci połączeń autobusowych w dni wolne od pracy. W analizie próbowano tutaj również uchwycić wpływ substytucyjności połączeń kolejowych między Zagórzem a Komańczą (a w sezonie Łupkowem). Generalnie uwzględnienie kolei nie wpływało praktycznie na zmianę niekorzystnych parametrów topologicznych sieci (ryc. 11-14, tab. 1). Także różnice pomiędzy parametrami sieci w wakacje i poza nimi były na tyle do siebie zbliżone, że ich szczegółowa analiza pozostała również bezcelowa.

Dlatego w dalszym postępowaniu badawczym nacisk został położony na odniesienie się do sytuacji w dni wolne od pracy w 1990 r. oraz w dni nauki szkolnej i robocze w 2019 r.

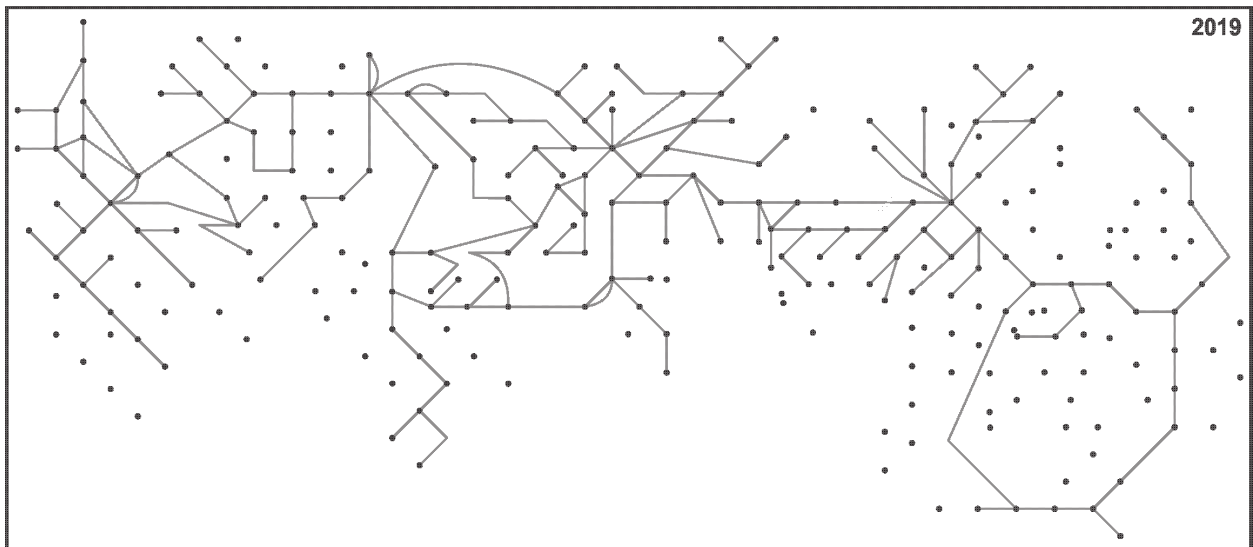
Gdy porówna się skalę zmian sieci w dni wolne od pracy pomiędzy 1990 r. a 2019 r. (tab. 1) to jej wielkość od strony topologicznej jest zatrważająca. W ujęciu, w którym pomija się wszystkie izolowane wierzchołki  $v$ , o nieco poniżej 30% uległa redukcji zarówno liczba krawędzi  $e$  (265 do 189), jak również wierzchołków grafu  $v$  (z 229 do 165). W podobnych proporcjach (o 1/3) zmniejszyła się liczba cyklomatyczna. Świadczy to o znaczącej redukcji liczby połączeń „domykających” cykle. Warto zwrócić uwagę, że w ciągu 29 lat zmienił się nie tylko charakter przewozów, ale także często dominujące



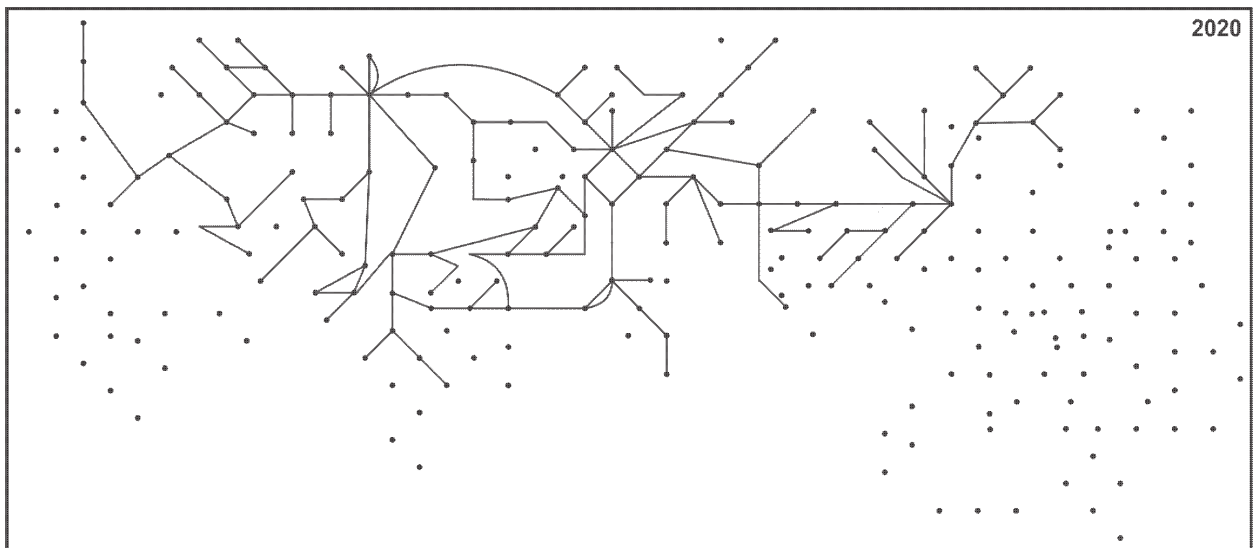
Ryc. 11. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 2019 r. w dni wolne od pracy i nauki szkolnej w postaci grafu.



Ryc. 12. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 2019 r. w dni wolne od pracy i nauki szkolnej w postaci grafu (z uwzględnieniem substytucyjnego połączenia kolejowego do Komańczy).



Ryc. 13. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 2019 r. w dni wolne od pracy i nauki szkolnej w okresie wakacyjnym w postaci grafu.



Ryc. 14. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w 2019 r. w wakacje w dni wolne od pracy i nauki szkolnej w postaci grafu (z uwzględnieniem substytucyjnego połączenia kolejowego do Komańczy).

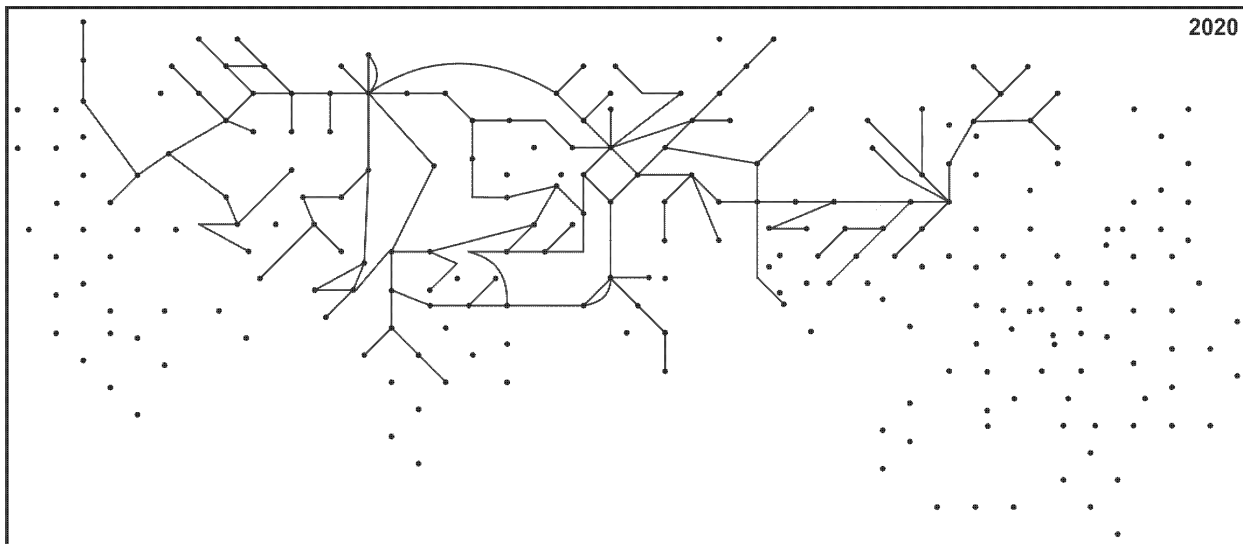
kierunki. Pozostałe wskaźniki grafowe analizowane w takim ujęciu praktycznie nie uległy zmianie. Gdy na rozpatrywaną sieć spojrzę się w odniesieniu do jej topologii w dzień nauki szkolnej w 2019 r. to redukcja liczby krawędzi i wierzchołków grafu wyniosła ok. 1/3 (odpowiednio  $e = 189$  versus 286 i  $v = 165$  versus 243). Przy czym wartość liczby cykloamatycznej spadła tu o 19. Świadczyło to o znacznym uproszczeniu się sieci do postaci rozbudowanego drzewa, z nielicznymi cyklami. Pod względem liczby cykloamatycznej  $m$  sieć ta zbliżyła się do stanu z 1974 r.

Obserwowany obraz uległ pewnej zmianie w momencie, gdy do analizy włączono izolowane wierzchołki (tab. 1). Tak przyjęta sieć nadal była charakteryzowana przez 189 krawędzi i aż 250 wierzchołków (przerwa-

nie połączeń wygenerowało dodatkowe wierzchołki na zakończonych ślepo ścieżkach grafu), z czego 85 wierzchołków stanowiło zarazem izolowane podgrafy. Skutkiem tego spójność grafu opisywana wskaźnikiem  $G_{ns}$  gwałtownie obniżyła się poniżej 1%. W przypadku wskaźników  $\alpha$  i  $\gamma$  Kansky'ego nie miał on aż tak wyraźnej informacji o skali niespójności sieci.

Stanowiąca przedmiot badania sieć transportowa została poddana analizie topologicznej także dla szczególnego momentu, jakim był pierwszy lock-down związany z pandemią COVID-19. Na początku kwietnia 2020 r. doszło do całkowitego wstrzymania lokalnego transportu publicznego na obszarze powiatów leskiego i bieszczadzkiego. Podobne procesy dotknęły górskie obszary pozostałych powiatów (Ciechański, 2020b). Jeśli





Ryc. 15. Sieć transportu autobusowego na badanym obszarze w momencie pierwszego lock-downu (początek kwietnia 2020 r.) w dni robocze.

spójrzy się na problem od strony topologicznej, to graf będący obrazem sieci w tym okresie charakteryzował się jedynie 132 krawędziami łączącymi 119 wierzchołków (tab. 1, ryc. 15). Dodatkowo wskutek redukcji sieci połączeń 124 kolejne wierzchołki były zarazem grafami izolowanymi. Wartość liczby cyklomatycznej  $\mu = 14$  spadła niemal trzykrotnie względem wartości dla tej samej sieci zaledwie rok wcześniej. Obniżeniu uległy także pozostałe wskaźniki grafowe wyraźnie sugerując, że spójność tej sieci się zmniejszyła. Szczególnie widoczne jest to, jeśli badaną sieć uznamy za graf niespójny. Wtedy na zmianę szczególnie reaguje wartość wskaźnika  $G_{ns}$ , która zmniejsza się z 111,76% do zaledwie 0,44%.

### Podsumowanie

Zmiany sieci publicznego pozamiejskiego autobusowego transportu zbiorowego na obszarze Beskidu Niskiego i Bieszczad stanowią niewątpliwie wdzięczny obiekt analizy topologicznej. Dotyczy to zarówno wykorzystania wskaźników, których pozycja w badaniach geografów transportu jest ugruntowana, jak również nowych autorskich propozycji. Celem niniejszego badania było sprawdzenie jak zachowuje się wskaźnik  $G_{ns}$  w przypadku sieci, w których występuje znaczny odsetek izolowanych podgrafów tworzonych niemal wyłącznie przez izolowane wierzchołki. Niestety, nie do końca spełnił on tu oczekiwania. Reagował na zmiany topologii znacznie gorzej niż w przypadku sieci, w których owszem, występowały podgrafy, jednak nie tak liczne i w postaci podsieci o większej liczbie krawędzi i wierzchołków. W trakcie niniejszego badania zaobserwowano następujące interesujące cechy wskaźnika  $G_{ns}$ :

- (1.) W przypadku sieci, w których liczba wierzchołków grafu  $v$  jest znacznie wyższa od liczby jego krawędzi  $e$  oraz liczba izolowanych podgrafów  $p$  jest o jedność wyższa od liczby izolowanych wierzchołków  $e$  wartość omawianego wskaźnika zawiera się między 0 a 1%. Jednocześnie liczba izolowanych podgrafów  $p$  jest w tym wariancie znacznie wyższa niż liczba cyklomatyczna  $\mu$ ;
- (2.) Pozostałe grafy niespójne, dla których liczba izolowanych podgrafów  $p$  jest mniejsza od liczby cyklomatycznej  $m$ , wartości wskaźnika  $G_{ns}$  zawierają się w przedziale pomiędzy 5 a 10%.

Niemniej jednak warto wciąż testować przedmiotowy wskaźnik w poszukiwaniu możliwości jego najlepszego wykorzystania.

### Piśmiennictwo

- Anez J., De La Barra T., Perez B., 1996, Dual graph representations of transport networks, *Transportation Research B*, 30(3), 209-216.
- Beim M., Błażczek A., Dąbrowska A., Dębiak P., Olczyk A., 2019, Badania dostępności publicznego transportu zbiorowego w podregionie pilskim, *Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG*, 22(4), 95-118.
- Blumenfeld-Liberthal E., 2009, The topology of transportation networks: a comparison between different economies, *Networks and Spatial Economics*, 9(3), 427-458.
- Chorley R.J., Haggett P. (red.), 1967, *Models in Geography*, Meuthen, London.
- Ciechański A., 2013, Rozwój i regres sieci kolei przemysłowych w Polsce w latach 1881-2010, *Prace Geograficzne*, 243, IGI PAN, Warszawa.
- Ciechański A., 2019, Wyzwania w badaniach sieci pozamiejskiego transportu autobusowego na przykładzie

- powiatów Beskidu Niskiego i Bieszczad, *Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG*, 22(2), 74-81.
- Ciechański A., 2020a, Bariery w przemieszczaniu się osób dorosłych na obszarach wykluczonych transportowo – przykład rejonu Komańczy, *Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG*, 23(5), 34-52.
- Ciechański A., 2020b, Non-urban public bus transport against the COVID-19 pandemic – evidence from the Low Beskids and the Bieszczady counties, *Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG*, 23(2), 28-34.
- Ciechański A., 2020c, Zmiany w sieci transportu publicznego na obszarach Beskidu Niskiego i Bieszczad 1990-2019 i ich konsekwencje, *Studia Regionalne i Lokalne*, 81(3), 49-77.
- Derrible S., Kennedy C., 2010, Characterizing metro networks: state, form and structure, *Transportation*, 37(2), 275-297.
- Derrible S., Kennedy C., 2011, Applications of graph theory and network science to transit network design, *Transport Reviews*, 31(4), 495-519.
- Dupuy G., Stransky V., 1996, Cities and highway networks in Europe, *Journal of Transport Geography*, 4(2) 107-121.
- Erath A., Löchl M., Axhausen K., 2009, Graph-theoretical analysis of Swiss road and railway networks over time, *Network Spatial Economy*, 9(3), 379-400.
- Garrison W. L., 1960, Connectivity of interstate highway system, *Papers and Proceedings, Regional Science Association*, 6, 121-137.
- Gattuso D., Mirello E., 2005, Compared analysis of metro networks supported by graph theory, *Networks and Spatial Economics*, 5, 395-414.
- Haggett P., 1967, Network models in geography [w:] R.J. Chorley, P. Haggett (red.), *Models in Geography*, Meuthen, London.
- Haggett P., 1968, *Prostranstvennyj analiz v ekonomicheskoy geografii*, Izdatelstvo Progress, Moskva.
- James G. A., Cliff A. D., Haggett P., Ord J. K., 1970, Some discrete distributions for graphs with applications to regional transport networks, *Geografiska Annaler B*, 52(1), 14-21.
- Jiang B., Claramunt C., 2004, Topological analysis of urban street networks, *Environment and Planning B*, 31(1), 151-162.
- Kansky K. J., 1963, Structure of Transportation Networks: Relationships Between Network Geometry and Regional Characteristics, *Department of Geography Research Paper*, 84, The University of Chicago, Chicago.
- Komusiński Sz., 2010, *Przekształcenia przestrzenne sieci pasażerskiego transportu kolejowego w Polsce w latach 1988-2008*, Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Kraków, praca doktorska, maszynopis powielony.
- Kozanecka M., 1980, *Tendencje rozwojowe komunikacji autobusowej w Polsce: studium geograficznoekonomiczne*, Wydawnictwo Naukowe Wyższej Szkoły Pedagogicznej, Kraków.
- Lijewski T., 1959, Rozwój sieci kolejowej Polski, *Dokumentacja Geograficzna*, 5, IG PAN, Warszawa.
- Lijewski T., Koziarski S., 1995, *Rozwój sieci kolejowej w Polsce*, Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa.
- Loo B.P.Y., 1999, Development of a regional transport infrastructure: some lessons from the Zhujiang Delta, Guangdong, China, *Journal of Transport Geography*, 7(1), 43-63.
- Potrykowski M., Taylor Z., 1982, *Geografia transportu: zarys problemów, modeli i metod badawczych*, PWN, Warszawa.
- Ratajczak W., 1980, *Analiza i modele wpływu czynników społeczno-gospodarczych na kształtowanie się sieci transportowej*, PWN, Warszawa-Poznań.
- Sagan I., Palmowski T., 1987, Rozwój sieci kolejowej na zapleczu aglomeracji gdańskiej w ujęciu grafowym, *Zeszyty Naukowe Wydziału Biologii, Geografii i Oceanologii Uniwersytetu Gdańskiego*, 16, 35-46.
- Taylor Z., 1975, Charakterystyka zmian w strukturze sieci transportowych w ujęciu grafowym, *Przegląd Geograficzny*, 47(3), 501-517.
- Taylor Z., 1979, Przestrzenna dostępność miejskiego systemu transportowego na przykładzie Poznania, *Studia KPZK*, 67, Warszawa.
- Taylor Z., 2007, *Rozwój i regres sieci kolejowej w Polsce*, Monografie, 7, IGI PAN, Warszawa.
- Tarkhov S., 2005, *Evolucionnaya morfologiya transportnykh setej*, Rossijskaya Akademiya Nauk, Institut Geografii, Smolenskogo Gumanitarnogo Universiteta, Izdatelstvo Universum, Smolensk-Moskva.
- Tarkhov S., 2006, Spatial regularities of disintegration transport networks, *Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG*, 12, 7-18.
- Wiśniewski Sz., 2014, Spójność sieci transportowych województwa łódzkiego, *Transport Miejski i Regionalny*, 9, 22-28.
- Ustawa z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym*, 2011, Dz.U., 5, poz. 13
- Xie F., Levinson D., 2007, Measuring the structure of road networks, *Geographical Analysis*, 39(3), 336-356.